

## 技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.8.796

## 관성항법장치 온도 안정화 상태에서의 초기정렬 성능분석

김천중\*, 유준\*\*

## Performance Analysis of Self-Alignment in the Temperature Stabilizing State of Inertial Navigation System

Cheon-Joong Kim\* and Joon Lyoo\*

## ABSTRACT

It is called self-alignment or initial alignment that INS(Inertial Navigation System) is aligned using the measurements from the inertial sensors as an accelerometer and a gyroscope and the inserted reference navigation information in the stop state. The main purpose of self-alignment is to obtain the initial attitude of INS. The accuracy of self-alignment is determined by the performance grade of the used inertial sensors, especially horizontal attitude accuracy by the horizontal accelerometer and vertical attitude accuracy by the E-axis gyroscope. Therefore the uncertain errors in the inertial sensors cause the performance of self-alignment to degrade. In this paper, we analyze theoretically and through a simulation how the errors of inertial sensors in the temperature stabilizing state, one of the uncertain errors, affect the accuracy of self-alignment.

## 초 록

정지 상태에서 관성항법장치를 구성하는 가속도계 및 자이로 측정치를 이용하여 초기 자세를 구하는 것을 초기정렬 혹은 자가정렬이라 한다. 초기정렬의 정밀도는 관성항법장치에 탑재되는 관성센서의 성능에 의하여 결정되며 수평축 자세는 수평축 가속도계, 수직축 자세는 E축 자이로 성능에 의해 결정된다. 그러므로 관성센서에서 발생된 불확실한 오차는 초기정렬의 정밀도를 저하시키는 주요원인이 된다. 본 논문에서는 관성센서의 불확실한 오차 중에서 관성항법장치에 전원이 인가되어 온도가 안정화 되는 상태에서의 관성센서 오차가 초기정렬 성능에 어떠한 영향을 미치는 가를 이론적으로 분석하고 시뮬레이션을 통하여 검증한 결과를 제시한다.

**Key Words** : Self-Alignment(초기 정렬), Temperature Stabilizing(온도 안정화)

## 1. 서 론

관성항법장치는 관성센서인 자이로 및 가속도계에서 출력되는 각속도 및 가속도 정보를 이용

하여 정밀한 위치, 속도, 자세, 각속도 및 가속도 정보를 실시간 제공하는 장비로서 유도무기 및 무기체계 자동화 목적으로 지상, 해상, 항공, 우주 분야 등 다양한 분야의 항법장치로 사용된다. 특히 관성항법장치는 GNSS(Global Navigation Satellite System)와 같은 전파항법에 비하여 별도의 외부장비가 필요치 않고, 전파방해를 받지 않는 등의 장점이 있으므로 정밀 항법정보가 요구되는 주요 무기체계에서는 관성항법장치를 주 항

† 2011년 1월 10일 접수 ~ 2011년 7월 26일 심사완료

\* 정회원, 국방과학연구소 3기술 4부  
교신저자, E-mail : kcj3651@add.re.kr  
대전광역시 유성구 조치원길 462

\*\* 정회원, 충남대학교 전자공학과

법장치로 많이 사용하고 있다[1,2,3,4].

관성항법장치는 전파항법과 같이 절대항법 방식을 이용하여 항법정보를 구하지 않고 상대항법 방식을 이용하여 항법정보를 구하기 때문에 관성항법장치 운용 전에 초기 항법정보가 요구된다. 관성항법장치 초기 항법정보 중에 관성항법장치를 구성하는 관성센서 출력을 이용하여 정지상태에서 초기 자세를 구하는 것을 자가정렬 혹은 초기정렬이라 하며 초기정렬 정밀도에 의하여 관성항법장치의 항법성능이 크게 좌우되므로 초기정렬 정밀도를 높이기 위한 많은 연구가 진행되었다[1,2,3].

관성항법장치를 항법 좌표계(navigation frame)에서 초기정렬하는 경우 수평축 자세는 E, N축 가속도계에 의하여 수직축 자세는 E축 자이로 정밀도에 의하여 정렬 성능이 결정된다[1,2,3]. 그러므로 김블형 관성항법장치의 초기정렬 성능 향상을 위하여 E, N축 가속도계 및 E 축 자이로 선정시 성능이 우수한 제품을 일반적으로 장착한다. 축 선정이 완료되어 제작된 관성항법장치에 전원이 인가되면 자이로 측정치로 좌표변환에 필요한 자세를 계산하고 이 자세를 이용하여 가속도 측정치를 항법 좌표계로 좌표변환하여 적분하면 항법 좌표계에서의 속도가 계산된다. 정지상태에서 이론적으로 항법 좌표계에서의 수평축 가속도 측정치는 영이 출력되어야 하며 자이로는 지구회전 각속도 성분이 출력되어야 한다. 이 상태에서 항법 좌표계에서 계산된 수평축 속도 성분을 모두 오차로 판단하여 이를 영으로 보내도록 자세 계산을 위한 제어 신호를 생성하고 제어신호와 자이로 측정치를 이용하여 정확한 자세를 계산하는 것이 초기정렬의 기본 원리이다[1,2,3]. 이와 같은 초기정렬 과정에서 가속도계 및 자이로에서 출력되는 측정치는 랜덤상수 성분의 바이어스 오차가 포함된 중력 가속도 및 지구 회전 가속도 성분만을 정확하게 출력한다는 가정에서 정렬루프를 설계한다. 그러나 실제로는 가속도계 및 자이로 출력은 온도 안정화가 완료되지 않은 상태에서 내외부의 온도 변화 등에 의하여 변하게 된다. 이러한 환경에서는 기존의 초기정렬 설계결과로는 원하는 정렬 정밀도를 만족하기 어렵게 된다. 이와 같은 상황을 가정하여 본 논문에서는 가속도계 및 자이로 온도 안정화 상태에서 관성항법장치 초기정렬 성능분석 결과를 제시한다. 이를 위하여 본 논문에서는 실험을 통하여 온도안정화 상태에서의 가속도계 바이어스 오차에 대한 거동특성을 분석하고 분석결과를 기반으로 가속도계 온도안정화 바이어스 오차를 모델링하였다. 실험을 통하여 모델링된 가속도계

온도안정화 오차 및 참고문헌 6에서 제시된 자이로 온도안정화 오차가 존재하는 경우 고정이득 방식의 초기정렬 루프의 성능을 이론적으로 분석한 결과를 제시하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 가속도계 및 자이로 온도 안정화 상태에서의 오차 거동특성을 실험적으로 확인하였으며 3장에서는 고정이득 방식의 초기정렬 방법을 적용하는 경우 가속도계 온도안정화 바이어스 오차가 초기정렬 성능에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였으며 4장에서는 3장에서 이론적으로 분석된 내용을 검증하기 위한 시뮬레이션 결과를 제시하고 5장에서 본 논문의 결론을 맺도록 한다.

## II. 가속도계 및 자이로 온도안정화 특성 및 오차 모델링

가속도계는 질량체에 인가된 힘(force)에 의해 동일방향으로 가속도가 발생하는 원리를 이용하여 가속도를 측정하는 장치로 그림 1과 같이 기구부와 전자부로 구성되어 있다. 기구부는 가속도를 감지하는 감지부, 펜듈럼(pendulum)을 영점에 위치시키기 위한 토크 구동부로 구성되며 전자부는 미세한 가속도 정보를 신호처리하여 출력하는 서어보 피드백루프로 구성된다. 그림 1에서 나타난 바와 같이 +g 방향으로 외부에서 가속도가 인가되면 기구부내의 감지부 정 중앙에 위치한 펜듈럼이 아래쪽으로 편향되며 이 결과로 상하부 용량기에 펜듈럼과의 거리차가 발생하여 전정용량의 상대적인 변화가 발생된다. 이 값은 픽오프(pick-off)를 통하여 전압으로 계측되어 증폭(amplification) 및 복조(demodulation) 과정을 거쳐 제어기에 입력된다. 제어기는 편향된 펜듈럼이 다시 영점으로 되돌아오도록 제어신호를 생

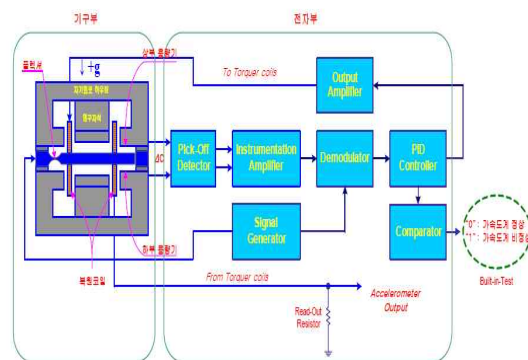


그림 1. 가속도계 구성도

성하여 토커 구동부인 복원코일에 전달하면 복원코일은 영구자석과 상호작용을 일으켜 펜듈럼을 영점 위치에 되돌려 보낸다. 토커 구동부에 전송된 제어 신호는 검출저항을 통하여 입력 가속도에 비례하는 전압을 발생시키며 이 전압을 정밀하게 측정함으로써 인가된 가속도를 정확하게 알 수 있다. 따라서 관성항법장치 구성을 위해서는 전류 형태로 전송되는 제어신호의 정밀 측을 위한 신호처리보드가 추가로 요구된다.

앞에서 언급한 가속도계의 기본원리를 바탕으로 일반적인 가속도계 오차모델을 구성하면 식 (1)과 같다[1,2,3,4].

$$\delta a^b = \delta b + S \times f^b + C \times f^b + A \times f_i \times f_j \quad (1)$$

위 식에서  $\delta b$ 는 바이어스 오차,  $S$ 는 척도계수 오차,  $C$ 는 cross-coupling 오차이며  $A$ 는 비등탄성 오차이다. 각각 가속도계 오차요소는 일반적으로 랜덤상수로 모델링 된다.

본 논문에서는 주로 가속도계 오차가 초기정렬에 미치는 영향을 분석하기 때문에 가속도 성분은 인가되어야 오차가 발생하는 척도계수, cross-coupling 및 비등탄성 오차를 무시하고 가속도계 오차모델을 새로이 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\delta a^b = \delta b \quad (2)$$

가속도계 바이어스 오차는 실제 펜듈럼의 기구적인 영점 위치와 픽오프에서 측정한 영점 위치의 차이에 의해서 발생한다. 내·외부 온도가 변화함에 따라 펜듈럼의 응력 및 감지부의 픽오프 특성이 변화되게 된다. 이에 따라 펜듈럼의 영점 위치가 변경되며 이를 보상하기 위한 제어 신호가 발생된다. 바로 이 신호가 외부 신호가 없는 상태에서 출력되는 가속도계 바이어스 오차가 된다. 그러므로 가속도계 바이어스 오차를 줄이기 위해서는 가속도계 전자부와 기구부를 동시에 고려한 설계가 요구된다. 특히 관성항법장치 운용온도 전 구간에서 동일한 성능을 가지기 위해서는 온도에 따라 기구부/전자부의 특성이 변하지 않아야 동일 성능의 유지가 가능하다. 그러나 실제로 이러한 특성을 가지는 가속도계의 설계는 불가능하기 때문에 온도에 대한 함수로 오차성분을 모델링하여 보상하는 방법을 사용한다. 그러나 이와 같은 모델링을 통한 오차보상은 가속도계 온도 안정화가 된 상태에서 오차계수를 산출하기 때문에 가속도계 온도가 안정화 되지 않은 상태에서는 오차를 보상하기 쉽지 않다. 특

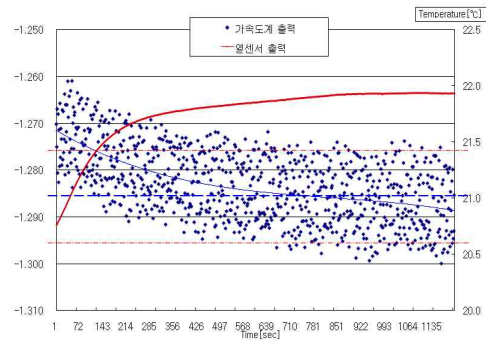


그림 2. 온도안정화 과정에서의 가속도계 출력

히 가속도계에 전원이 인가되면 전자부의 온도가 급격히 상승하기 때문에 전자부 발열에 의한 온도안정화 과정에서 모델링 되지 않은 가속도계 오차가 발생된다. 아래 그림 2는 가속도계 온도안정화 과정에서 가속도계 바이어스 오차의 거동 특성을 보여주고 있는 실험결과이다. 그림 2는 가속도계 온도 안정화 과정에서 가속도계 출력이 시간이 경과함에 따라 안정화된 값으로 수렴하는 것을 보여주고 있으며 이는 가속도계 전원 인가 직후에는 식 (2)와 같이 랜덤 상수로 바이어스 오차를 모델링하는 것이 타당하지 않음을 보여주는 결과이다.

그림 2에서 오른쪽은 가속도계 출력신호를 나타내며 왼쪽은 가속도계 내부의 온도센서에서 측정된 온도 데이터이다. 그림에서 산발적인 모양의 점은 가속도계 측정치를 점으로 도시한 것이며 이의 평균을 그림으로 나타낸 것이 -1.270에서 시작하는 선이다. 최종적으로 수렴하는 가속도계 출력치는 -1.285에서 시작하는 선이며 측정치가 점차로 변화량이 작아지며 최종 수렴값인 -1.285 부근으로 수렴하는 특성을 보여주고 있다. 이와 같은 특성은 대부분의 가속도계에서 보여주는 것으로 이 값은 온도에 대한 함수로 바이어스 오차를 모델링하여 보상 후에 남아있는 오차로 실제 초기정렬에서 사용하는 가속도 측정치이다. 이와 같은 특성을 가지는 가속도계 온도안정화 바이어스 오차를 동체 좌표계에서 모델링하면 식 (3)과 같다. 식 (3)에서  $\delta a^v$ 는 가속도계 온도안정화 바이어스 오차의 크기이며  $T_i$ 는 온도안정화 오차의 시정수이다.  $\delta a^v$  및  $T_i$ 는 가속도계마다 다른 값을 가진다.

현재 그림 1의 형태를 가지는 소형 항법용 가속도계에서 가장 좋은 성능을 가지는 가속도계인

$$\delta a^b = (1 - e^{-\frac{t}{T_i}}) \delta a^v \quad (3)$$

QA-3000도 그림 2와 유사한 형태의 온도안정화 오차가 존재하며 이를 모델링 방법을 통하여 보상한다[5]. 그러므로 식 (3)과 같이 온도안정화 바이어스 오차를 모델링하는 것이 타당하다.

온도 안정화 상태에서의 자이로 바이어스 오차는 그림 2와 같이 실험을 통하여 확인하기 매우 어렵다. 정지상태에서 가속도계에서 측정되는 중력 가속도는 신호의 크기가 매우 크고 하나로 그 신호를 직접 측정하기 때문에 정밀하게 측정치의 산출이 가능하다. 그러나 본 논문의 주요 연구대상인 링레이저 자이로의 경우 출력되는 지구회전 각속도가 매우 작고 펄스 형태로 산출되기 때문에 양자화 잡음, 디더링(dithering)에 의한 각속도 성분 등으로 인하여 온도안정화 상태에서의 측정치를 분석하여 바이어스 오차를 확인하기가 매우 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 참고문헌 6에서 제시한 온도 안정화 상태에서의 링레이저 자이로 바이어스 오차를 인용하여 본 논문의 주요 연구대상인 초기정렬 성능분석 결과를 제시하였다. 참고문헌 6에서 제시한 링레이저 자이로 바이어스 오차 모델은 식 (3)과 동일한 모델을 사용하기 때문에 본 논문에서는 이를 별도로 표기하지 않았다.

### III. 관성항법장치 초기정렬 성능분석

일반적으로 관성항법장치의 정렬은 고정이득 방식과 가변이득 방식을 많이 사용한다. 본 논문에서는 가속도계 온도안정화 바이어스 오차에 대한 초기정렬 성능 분석을 위하여 2차 제어기를 이용한 고정이득 방식의 정렬루프를 적용한 경우를 가정하여 분석을 수행하였다.

일반적으로 2차 제어기를 이용한 고정이득 방식의 스트랩다운 관성항법장치의 정렬루프는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다[1]. 참고문헌 2에서 제시한 김블형 관성항법장치 초기정렬시 수직축에도 궤환(feedback) 신호를 제공하여 3차의 자세오차 방정식을 구성하도록 정렬루프를 구성하였다. 이와 같은 경우에는 제어신호 생성시 가속도 출력이 영이 되도록 생성되는 신호에 항법 좌표계에서의 지구회전 각속도를 더하여 제어신호를 생성한다. 그러므로 방위각 오차가 큰 경우 E축 자세오차를 생성하고 E축 자세오차는 N축 가속도 오차를 발생시킨다. 그러므로 E축 자세오차 변화율이 영이 되도록 N축 가속도계 출력을 수직축 자세오차를 보상하기 위한 궤환 신호로 사용하므로 3차의 자세오차 방정식이 유도된다. 그러나 본 논문에서 제시한 스트랩다운 관성항법장

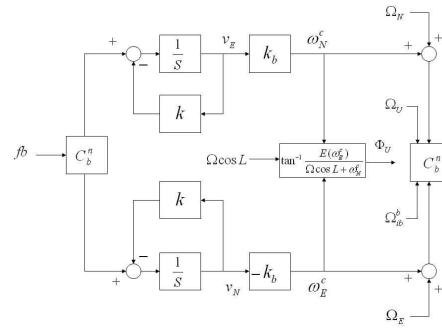


그림 3. 초기정렬 루프의 구성도

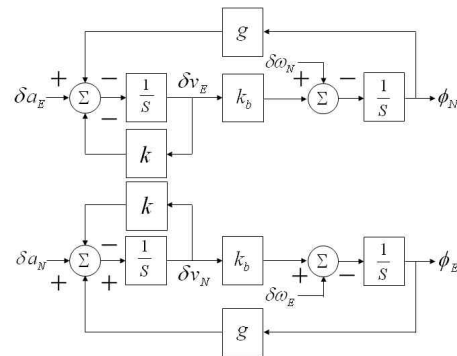


그림 4. 초기정렬 루프의 오차모델

치의 정렬루프는 수평축 속도가 영이 되도록 제어신호를 생성하므로 수평축 속도와 수직축 자세오차와의 연관성이 직접적으로 없으므로 그림 2와 같은 정렬루프의 구성이 가능하다. 그림에서 나타난 바와 같이 항법좌표계에서 수평축 가속도계 측정치  $f^b$ 가 영이 되도록 2차 제어기를 이용하여 제어신호( $\omega_E^c, \omega_N^c$ )를 생성하고 이를 이용하여 동체 좌표계와 항법 좌표계 사이의 좌표변환행렬  $C_b^n$ 을 계산하여 수평축 정렬을 수행하며 수직축 자세는 생성된 제어신호를 이용하여 계산한다. 그림 3에서  $k, k_b$ 는 정렬루프 계수이며  $v_E, v_N$ 은 항법좌표계에서의 E/N축 속도,  $\Omega$ 는 지구회전 각속도,  $L$ 은 위도,  $\Omega_E, \Omega_N, \Omega_U$ 는 항법 좌표계에서의 각속도,  $\Omega_{ib}^b$ 는 자이로에서 출력되는 각속도를 의미한다.

정렬루프 해석을 위해서는 정렬루프에 대한 오차방정식이 요구되며 이를 그림으로 나타내면 그림 4와 같고 이를 식으로 나타내면 식 (4), (5)와 같다[1].

$$\begin{bmatrix} \delta\phi_E \\ \delta\phi_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -k_b \\ g & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_E \\ \delta v_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\delta w_E(t) \\ \delta a_N(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_N \\ \delta v_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_b \\ -g & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_N \\ \delta v_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\delta w_N(t) \\ \delta a_E(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

위 식에서  $g$ 는 중력 가속도,  $\delta a_E$ ,  $\delta a_N$ 은 항법 좌표계에서의 가속도 오차,  $\delta \omega_E$ ,  $\delta \omega_N$ 은 항법 좌표계에서의 자이로 오차,  $\delta v_E$ ,  $\delta v_N$ 은 항법 좌표계에서의 속도오차,  $\phi_E$ ,  $\phi_N$ 은 항법 좌표계에서의 자세오차,  $k$ ,  $k_b$ 는 정렬루프 계수를 의미한다. 식 (4), (5)를 라플라스 변환을 통하여 정리하면 식 (6)~(9)와 같다.

$$\delta V_E(s) = \frac{s\delta A_E(s) + g\delta \Omega_N(s)}{s^2 + ks + k_bg} \quad (6)$$

$$\delta V_N(s) = \frac{s\delta A_N(s) - g\delta \Omega_E(s)}{s^2 + ks + k_bg} \quad (7)$$

$$\Phi_E(s) = \frac{-k_b\delta A_N(s) - (s+k)\delta \Omega_E(s)}{s^2 + ks + k_bg} \quad (8)$$

$$\Phi_N(s) = \frac{k_b\delta A_E(s) - (s+k)\delta \Omega_N(s)}{s^2 + ks + k_bg} \quad (9)$$

위 식에서 나타난 바와 같이 정렬을 위한 2차 제어기는 가속도계 및 자이로 오차에 대한 속도 및 자세오차의 관계가 2차 저역통과 필터의 구조를 나타내는 것을 확인할 수 있으며 절점 주파수 (corner frequency)  $\omega_c = \sqrt{k_bg}$  가 되며 이는 정렬루프 설계시 설정되는  $k_b$  값에 따라 결정된다. 따라서 정렬루프 설계시 가속도계 및 자이로 측정치에 포함되어 있는 정현파 성분이 적절히 제거되도록  $\omega_c$ 를 결정하여야 한다. 그러나  $\omega_c$ 는 정렬루프의 수렴속도도 결정하기 때문에 너무 작은 값을 설정하게 되면 응답속도가 너무 느려 정렬루프가 외란에 영향을 많이 받게 된다. 그러므로 필터링 기능과 정렬루프의 응답속도를 고려하여 적용체계에 최적이 되도록 값을 선정하여야 한다.

식 (6)~(9)의 정확한 해석을 위해서는 가속도계 및 자이로 오차에 대한 모델이 요구된다. 앞에서 언급한 바와 같이 본 논문의 목적이 가속도계 및 자이로 온도안정화 바이어스 오차에 초기정렬 성능분석이므로 동체 좌표계에서의 가속도계 온도안정화 오차가 포함된 가속도계 오차 모델인 식 (3)을 해석의 편의를 위하여 동체 좌표계와 항법 좌표계가 동일하다고 가정하여 라플라스 변환하여 가속도계 및 자이로 바이어스 오

차를 정리하면 식 (10), (11)과 같다.

$$\delta A^N(s) = \left[ \frac{\frac{1}{T_i}}{s(s + \frac{1}{T_i})} \right] \delta a^v \quad (10)$$

$$\delta \Omega^N(s) = \left[ \frac{\frac{1}{T_j}}{s(s + \frac{1}{T_j})} \right] \delta \omega^v \quad (11)$$

식 (10), (11)을 식 (6)~(9)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 유도된다. 아래 식에서  $\delta a_{iv}$ ,  $\delta \omega_{iv}$ 는 식 (10), (11)에서  $\delta a^v$ ,  $\delta \omega^v$ 의  $i$ 축 성분이다.

$$\begin{aligned} \delta V_E(s) = & \left\{ \frac{\frac{\delta a_{Ev}}{T_i}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_bg} \right\} \left\{ \left[ \frac{1}{s + \frac{1}{T_i}} \right] - \left[ \frac{s + (k - \frac{1}{T_i})}{s^2 + ks + k_bg} \right] \right\} + \\ & g\delta \omega_{Nv} \left\{ \left[ \frac{1}{k_bg} \right] \left[ \frac{1}{s} \right] - \left[ \frac{1}{\frac{1}{T_j^2} - \frac{k}{T_j} + k_bg} \right] \left\{ \left[ \frac{1}{s + \frac{1}{T_j}} \right] - \right. \right. \\ & \left. \left. \left[ \frac{\frac{1}{T_j}(k - \frac{1}{T_j})}{(\frac{1}{T_j}(k - \frac{1}{T_j})s + (\frac{1}{T_j}(k^2 - \frac{k}{T_j} - k_bg))}{k_bg})} \right] \right\} \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta V_N(s) = & \left\{ \frac{\frac{\delta a_{Nv}}{T_i}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_bg} \right\} \left\{ \left[ \frac{1}{s + \frac{1}{T_i}} \right] - \left[ \frac{s + (k - \frac{1}{T_i})}{s^2 + ks + k_bg} \right] \right\} - \\ & g\delta \omega_{Ev} \left\{ \left[ \frac{1}{k_bg} \right] \left[ \frac{1}{s} \right] - \left[ \frac{1}{\frac{1}{T_j^2} - \frac{k}{T_j} + k_bg} \right] \left\{ \left[ \frac{1}{s + \frac{1}{T_j}} \right] - \right. \right. \\ & \left. \left. \left[ \frac{\frac{1}{T_j}(k - \frac{1}{T_j})}{(\frac{1}{T_j}(k - \frac{1}{T_j})s + (\frac{1}{T_j}(k^2 - \frac{k}{T_j} - k_bg))}{k_bg})} \right] \right\} \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

위 식에서 2차 특성 방정식을 분모로 가지는 항은 시정수가 자이로 및 가속도계 온도안정화 바이어스 오차의 시정수  $T_j$ ,  $T_i$ 와 비교하여 매우 작아 매우 빠른 속도로 수렴하게 된다. 특히 초기정렬은 30초 정도의 개략정렬을 통하여 수평축 자세를 미리 안정화시킨 상태에서 수직축 자세를 구하는 정밀정렬을 수행한다. 그러므로 수 초 내에 안정화된 상태에 진입하는 2차 특성 방정식을 분모로 가지는 항을 무시하고 가속도계 및 자이로 온도안정화 바이어스 오차에 의한 초기정렬

$$\begin{aligned} \Phi_E(s) = & -k_b \delta a_{N_V} \left\{ \left[ \frac{1}{k_b g} \right] \left[ \frac{1}{s} \right] - \left[ \frac{1}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_b g} \right] \right. \\ & \left. \left[ \left( \frac{1}{s + \frac{1}{T_i}} \right) - \left( \frac{\frac{1}{T_i} (k - \frac{1}{T_i})}{k_b g} s + \left( \frac{\frac{1}{T_i} (k^2 - \frac{k}{T_i} - k_b g)}{k_b g} \right) \right) \right] \right\} - \\ & \delta \omega_{E_V} \left\{ \left[ \frac{k}{k_b g} \right] \left[ \frac{1}{s} \right] + \left[ \frac{1}{\frac{1}{T_j^2} - \frac{k}{T_j} + k_b g} \right] \left[ \left( \frac{\frac{1}{T_j} - k}{s + \frac{1}{T_j}} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. \left( \frac{1}{k_b g T_j} \right) \left( \frac{(k^2 - \frac{k}{T_j} + k_b g)s + (k^3 - \frac{(k^2 - k_b g)}{T_j} - 2k_b g k)}{s^2 + ks + k_b g} \right) \right] \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_N(s) = & k_b \delta a_{E_V} \left\{ \left[ \frac{1}{k_b g} \right] \left[ \frac{1}{s} \right] - \left[ \frac{1}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_b g} \right] \right. \\ & \left. \left[ \left( \frac{1}{s + \frac{1}{T_i}} \right) - \left( \frac{\frac{1}{T_i} (k - \frac{1}{T_i})}{k_b g} s + \left( \frac{\frac{1}{T_i} (k^2 - \frac{k}{T_i} - k_b g)}{k_b g} \right) \right) \right] \right\} - \\ & \delta \omega_{N_V} \left\{ \left[ \frac{k}{k_b g} \right] \left[ \frac{1}{s} \right] + \left[ \frac{1}{\frac{1}{T_j^2} - \frac{k}{T_j} + k_b g} \right] \left[ \left( \frac{\frac{1}{T_j} - k}{s + \frac{1}{T_j}} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. \left( \frac{1}{k_b g T_j} \right) \left( \frac{(k^2 - \frac{k}{T_j} + k_b g)s + (k^3 - \frac{(k^2 - k_b g)}{T_j} - 2k_b g k)}{s^2 + ks + k_b g} \right) \right] \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta v_E(t) = & \left[ \frac{\frac{\delta a_{E_V}}{T_i}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_b g} \right] \left[ e^{-\frac{t}{T_i}} \right] + \\ & \delta \omega_{N_V} \left[ \left( \frac{1}{k_b} \right) - \left( \frac{1}{\frac{1}{T_j^2} - \frac{k}{T_j} + k_b g} \right) \right] \left[ e^{-\frac{t}{T_j}} \right] \quad (16) \end{aligned}$$

성능을 분석해도 본 논문의 분석결과에 아무런 영향이 없다. 식 (12)~(15)에서 1차 특성 방정식을 가지는 항만을 역 라플라스 변환하여 정리하면 식 (16)~(19)와 같다.

식 (18)~(19)는 속도 및 자세오차가 가속도계 및 자이로 온도안정화 바이어스 오차의 시정수에 의하여 시간이 경과함에 따라 점차로 수렴하는 특성을 보이며 크기는 정렬루프의 계수 및 온도

$$\begin{aligned} \delta v_N(t) = & \left[ \frac{\frac{\delta a_{N_V}}{T_i}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_b g} \right] \left[ e^{-\frac{t}{T_i}} \right] - \\ & \delta \omega_{E_V} \left[ \left( \frac{1}{k_b} \right) - \left( \frac{1}{\frac{1}{T_j^2} - \frac{k}{T_j} + k_b g} \right) \right] \left[ e^{-\frac{t}{T_j}} \right] \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_E(t) = & -k_b \delta a_{N_V} \left[ \left( \frac{1}{k_b g} \right) - \left( \frac{1}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_b g} \right) \right] \left[ e^{-\frac{t}{T_i}} \right] - \\ & \delta \omega_{E_V} \left[ \left( \frac{k}{k_b g} \right) + \left( \frac{\frac{1}{T_j} - k}{\frac{1}{T_j^2} - \frac{k}{T_j} + k_b g} \right) \right] \left[ e^{-\frac{t}{T_j}} \right] \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_N(t) = & k_b \delta a_{E_V} \left[ \left( \frac{1}{k_b g} \right) - \left( \frac{1}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_b g} \right) \right] \left[ e^{-\frac{t}{T_i}} \right] - \\ & \delta \omega_{N_V} \left[ \left( \frac{k}{k_b g} \right) + \left( \frac{\frac{1}{T_j} - k}{\frac{1}{T_j^2} - \frac{k}{T_j} + k_b g} \right) \right] \left[ e^{-\frac{t}{T_j}} \right] \quad (19) \end{aligned}$$

안정화 바이어스 오차의 시정수에 의하여 결정됨을 보여주고 있다. 그러나 중급성능 관성항법장치의 경우 온도 안정화 오차의 크기가 가속도계의 경우 수십  $\mu g$ 이내, 자이로의 경우 0.01deg/hr 이내로 매우 작기 때문에 수평축 속도 및 자세오차에는 크게 영향이 없을 것으로 판단된다. 그러나 수직축 자세의 경우 수평축 제어신호를 이용하여 계산하기 때문에 작은 양의 속도 변화에도 크게 영향을 받는다. 이를 분석하기 위하여 먼저 수직축 자세오차 계산식을 먼저 유도한다. 수직축 자세 계산에 사용되는 제어신호  $\omega_E^c(t), \omega_N^c(t)$ 의 오차신호를  $\delta \omega_E^c(t), \delta \omega_N^c(t)$ 로 가정하고 섭동기법을 이용하여 유도하면 아래와 같다.

$$\delta \omega_E^c(t) = -k_b \delta v_N(t) \quad (20)$$

$$\delta \omega_N^c(t) = k_b \delta v_E(t) \quad (21)$$

수직축 자세오차  $\delta \Omega_v$ 는 그림 3의 수직축 자세 계산식  $\Omega_v$ 에 섭동기법을 적용하여 유도하면 식 (22)와 같다.

$$\delta\Omega_U = \frac{\delta\omega_E^c}{\Omega \cos L} = -\frac{k_b \delta v_N(t)}{\Omega \cos L} \quad (22)$$

식 (22)에 식 (17)의 N축 속도오차를 대입하여 정리하면 식 (23)과 같다.

$$\delta\Omega_U = \frac{-\left(\frac{k_b \delta a_{NV}}{T_i} - \frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_b g\right) e^{-\frac{t}{T_i}}}{\Omega \cos L} + \frac{\delta\omega_{Ev} \left(1 - \frac{k_b}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_b g} e^{-\frac{t}{T_i}}\right)}{\Omega \cos L} \quad (23)$$

식 (23)은 가속도계 및 자이로 온도안정화 바이어스 오차와 수직축 자세오차간의 관계를 정리한 식이다. 식에서 알 수 있듯이 수평축 자세오차는 다르게 작은 가속도계 온도안정화 오차라도 매우 큰 수직축 자세오차를 발생시킬 수 있음을 보여주고 있다. 가속도계 온도안정화 오차에 의해서 발생하는 수직축 자세오차의 크기는 식 (3)의 크기 및 시정수에 의하여 결정됨을 식 (23)은 보여주고 있다. 그러나 자이로의 온도 안정화 오차는 분석결과 수직축 자세에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 온도안정화 상태에서의 자이로 및 가속도계 바이어스 오차와 자세오차와의 관계를 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 제시한다. 시뮬레이션은 3장의 이론적인 분석에서 나타난 바와 같이 자세오차에 많은 영향을 미치는 가속도계 오차만을 대상으로 수행하였다. 시뮬레이션 구성도를 그림으로 나타내면 그림 5와 같다. 시뮬레이션은 그림 5에서 나타난 바와 같이 관성항법장치를 모델링하고 가속도계 측정치에 가속도계 온도 안정화 오차가 존재한다고 가정하여 관성항법장치 출력치를 이용하여 정렬루프를 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션을 수행하기 위한 조건은 정렬루프의 절점주파수는 2Hz라 가정하였으며 식 (3)의 온도안정화 상태에서의 가속도계 바이어스 오차가  $30\mu g$ 의 크기를 가지며 시정수는 300초라 가정하였다. 가속도계 바이어스 오차는 수평축에만 존재하며 추가적인 오차는 없는 것으로 가정하였

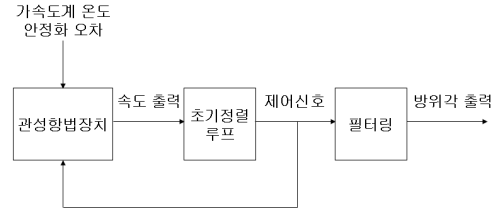


그림 5. 시뮬레이션 구성도

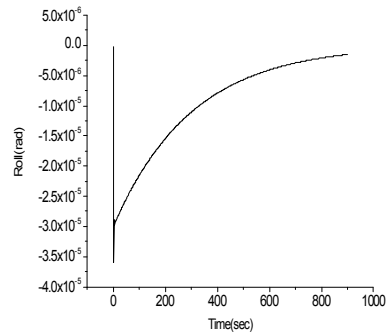


그림 6. 롤 각 시뮬레이션 결과

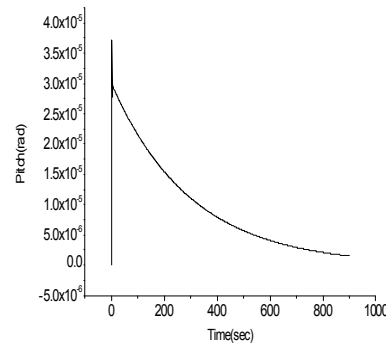


그림 7. 피치 각 시뮬레이션 결과

다. 초기에 관성항법장치의 자세는 모두 영도가 되도록 장착되어 있는 상태를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 관성항법장치 초기정렬 상태에서의 자세를 그림으로 나타내면 그림 6~8과 같다.

그림 6은 수평축 자세각인 롤(roll) 각이 초기에  $30\mu rad$ 의 각을 가지며 서서히 감소하는 형태를 가지는 것으로 나타났다. 또 다른 수평축 자세인 피치(pitch)각도 롤 각과 부호는 반대이나 동일한 초기 각을 가지며 자세가 점차 감소하는 형태를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 수학적 (18)~(19)을 이용하여 검증이 가능하다. 식 (18)~(19)는 가속도계 바이어스 오차와 수평

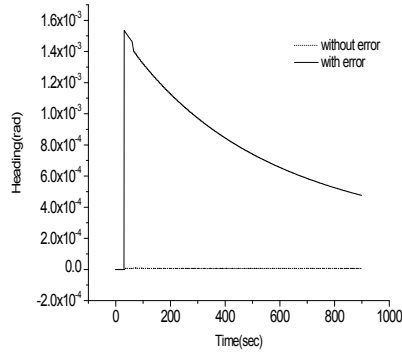


그림 8. 방위 각 시뮬레이션 결과

축 자세와의 정확한 관계식을 나타내는 식이다. 이 식에서 가속도계 바이어스의 시정수가 매우 크기 때문에 2번째 항에 해당하는 시정수 관련된 항이 절점 주파수와 비교하여 매우 작아 시정수 관련항을 무시하여 정리하면 식 (24)~(25)와 같은 새로운 수식이 유도된다. 식 (24)~(25)를 이용하여 롤 및 피치 각을 계산하면 시뮬레이션을 통하여 구한 그림 6~7의 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있다. 이러한 결과는 본 논문에서 유도된 수식이 모두 정확함을 보여주는 결과이다.

$$\phi_E(t) \approx -\frac{\delta a_{Nv}}{g} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{T_i}} \right] \quad (24)$$

$$\phi_N(t) \approx \frac{\delta a_{Ev}}{g} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{T_i}} \right] \quad (25)$$

그림 8은 수직축 자세인 방위(heading) 각에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 점선은 오차가 없는 상태에서의 방위각으로 영도를 가리키고 있으나 가속도계 바이어스가 존재하는 경우를 나타내는 점선은 초기에 약 1.6mrad의 방위각 오차를 가지며 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 시뮬레이션 결과는 온도 안정화 상태에서의 가속도계 바이어스 오차와 방위각과의 관계식인 식 (23)을 통하여 검증이 가능하다. 식 (23)에 가속도계 바이어스 모델과 관련된 항을 대입하여 정렬 30초 및 60초 순간의 방위각을 계산하면 각각 1.5mrad과 1.4mrad이 계산된다. 이러한 결과는 그림 8에서 나타난 결과와 동일한 결과이며 이는 식 (23)이 정확함을 보여주는 것이다. 그림 8에서 방위각이 서서히 감소하는 것은 그림 3에서 나타난 바와 같이 방위각 계산과정에서 수평축 제어신호를 평균하여 방위각을 계산하기 때문에 매 순간 발생한 방위각 오차가 평탄화(smoothing) 되는 효과를 가지기 때문이다.

본 장에서 제시한 시뮬레이션 결과로 판단할 때 본 논문에서 유도된 온도 안정화 상태에서의 자이로 및 가속도계 바이어스 오차와 자세 오차와의 관계식은 정확하게 유도되었다고 판단할 수 있다

## V. 결 론

본 논문은 관성항법장치의 초기정렬시 자이로 및 가속도계 오차요소에 가속도계 온도안정화 바이어스 오차가 포함되어 나타나는 경우 초기정렬 성능에 어떠한 영향을 미치는 가를 이론적으로 분석하고 이를 시뮬레이션을 통하여 검증한 결과를 제시하였다. 분석결과 자이로 및 가속도계 온도안정화 바이어스 오차는 수평축 속도 및 자세에는 큰 오차를 유발하지 않으나 수직축 자세는 작은 가속도계 온도안정화 오차에 의하여 큰 자세오차가 발생할 수 있음을 증명하였으며 수직축 자세오차의 크기는 가속도계 온도안정화 바이어스 오차의 시정수 및 크기에 의하여 결정됨을 증명하였다. 이러한 결과는 관성항법장치 적용체계에 따른 초기정렬 기법 설계 및 적용 가속도계 성능규격을 정하는 데 유용하게 적용될 것으로 사료된다.

향 후에는 본 논문의 결과를 기반으로 자이로 및 가속도계 온도안정화 오차가 존재하는 상태에서 관성항법장치 초기정렬 성능저하를 막기 위한 정렬기법을 개발할 예정이다.

## 참고문헌

- 1) O. Salychev, Inertial Systems in Navigation and Geophysics, Bauman MSTU Press, 1998.
- 2) K. R. Britting, Inertial Navigation Systems Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- 3) D. H. Titterton and J. H. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series, 1977.
- 4) G. M. Siouris, Aerospace Avionics Systems, Academic Press, Inc., 1993.
- 5) S. A. Foote and D. B. Grindeland., "Model QA3000 Q-FLEX Accelerometer High Performance Test Results", PLANS, 1992.
- 6) M. M. Kuritsky and M. S. Goldstein, "Inertial Navigation", Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 10, Oct. 1983.